

TARTU ÜLIKOOL
LOODUS- JA TEHNOLOOGIATEADUSKOND
Füüsika instituut

Laura Lõugas
Muutused merepõhja taimestiku katvuses
Landsati piltide põhjal
Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Ph.D Tiit Kutser
Tartu Ülikooli Eesti Mereinstituut

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Programmijuht:

allkiri, kuupäev

Tartu 2013

Sisukord

Sissejuhatus	4
1 Veekaugseire põhimõte	7
<i>1.1 Optiliselt aktiivsed ained</i>	8
<i>1.1 Madalate vete kaugseire</i>	10
2 Veekogude optiline klassifikatsioon	12
3 Satelliitsensorid veekogude kaugseireks	12
<i>3.1 Landsat</i>	14
4 Uuritavate alade kirjeldused	16
<i>4.1 Haapsalu laht</i>	16
<i>4.2 Väike väin</i>	17
5 Materjal ja metoodika	19
<i>5.1 Landsati pildid</i>	19
5.1.1 Landsat 7 pildid	20
<i>5.2 Piltide töötlemine</i>	21
6 Tulemused	22
7 Kokkuvõte	25
8 Detecting long time changes in benthic algae cover using Landsat image archive	26

Sissejuhatus

Maa pinnast on peaaegu kolmveerand kaetud ookeanide, merede ning väiksemate siseveekogudega. Suur osa inimpopulatsioonist, tööstusest, põllumajandusest, rekreatsioonist ning turismindusest on koondunud just rannikuvete lähedusse. Paljudel merepõhja kooslustel ja ökosüsteemidel rannikualadel, suudmealadel ja siseveekogudes on nii äriline kui ka ökoloogiline väärtus (Werdell & Roesler, 2003). Mererand on koht, kus paiknevad spetsiifiline taimestik ja loomastik, aga ka koht, kus areneb infrastruktuur ning asuvad turismi rajatised. Antropogeenne tegur on suuresti vastutav veekeskonna järjest halveneva seisundi eest. Seepärast on vajalik seisundi pidev monitooring ning rannikuvete seisundit mõjutada võivate tegevuste kompleksne planeerimine. Rannikualadele jõuavad kõik maismaa jäätmed, sealhulgas magevesi, reovesi ja erosiooniproduktid ning need alad on mõjutatud mitmete protsesside nagu lainete, loodete ja rannikuhoovuste poolt. Tagajärjena on rannikujoon väga dünaamiline piiritsoon nii oma morfoloogiliste kui ka ökoloogiliste omaduste poolest (Barale & Folving, 1996).

Säästev majandamine rannikukeskkonnas vajab regulaarset täpse teabe kogumist ökosüsteemi tervise näitajate kohta (Phinn et al. 2004). Põhjataimestiku katvus ja muutuste trendid on vee kvaliteedi indikaatoriteks rannikualadel. Põhjataimestiku objektiivse monitooringu eesmärk on jälgida lühi- ja pikaajalisi muutusi liigilises koosseisus ja struktuuris. Rannikumere põhjataimestikku kvantitatiivne analüüs võimaldab adekvaatselt hinnata rannikumere keskkonna seisundit, pakkuda paremaid tõendeid keskkonna muutuste kohta ning kirjeldada protsesse, mis on tingitud inimtegevusest. Lisaks on merepõhja elustikku vaja kaardistada ka ruumilise planeerimise (tuuleparkide ja sadamate ehitus, kaitsealade planeerimine, kalapüügi reguleerimine, jne.) tarbeks.

Täpset ja võrdlemisi põhjalikku informatsiooni annavad mitmesugused kontaktmõõtmised. Merepõhja vetikate katvuse kaardistamine tavapäraste meetoditega (sukeldumine, veealune video, kopaproovid) annab suure täpsuse ja kõrge ruumilise lahutuse (Werdell & Roesler, 2003), aga on väga kallis ja piiratud ajateguri ning tööjõuga, mis on vajalikud suurte alade kaardistamiseks. Lisaks võib mõnes piirkonnas olev sobimatu ilm piirata sukeldujal hooajaliste muutuste jälgimist (Wittlinger & Zimmerman, 2000) või ohtlik merepõhi takistada paadi/laevaga vajaliku alani jõudmist. Seega ei taga kontaktmõõtmised piisavalt operatiivset

ja laiaulatuslikku teavet veekogu kvantitatiivsete näitajate ning vees aset leidvate muutuste kohta.

Kaugseire meetodite rakendamine täiendab kontaktmõõtmisi oluliselt ning annab lisaks teavet ka raskesti ligipääsetavate piirkondade kohta. Kaugseire annab potentsiaalselt kiire võimaluse kaardistada merepõhja vetikad, mis liigiti erinevad oma optiliste omaduste poolest. Ühtlasi on satelliitandmestiku põhjal võimalik koostada detailseid aegridu, millelt väljajoonistuvaid muutusi on keeruline ja kulukas jälgida välitöödel sooritatud mõõtmistega.

Substraadi katte liikide ja nende biofüüsikaliste omaduste kaardistamine põhineb nende valguse peegeldamise omadustel ning seda on edukalt teostatud optilistelt selgetes vetes, madalates rannikupiirkondades ja korallrahudega vetes (Anstee et al., 2000; Dekker et al., 2001; Kutser et al., 2002; Phinn et al., 2004). Võrreldes korallrahude põhjakoosluste peegeldumisomadustega (Hochberg & Atkinson, 2000, 2003; Karpouzil et al., 2004; Minghelli-Roman et al., 2002) ja mererohu kooslustega (Fyfe, 2003; Pasqualini et al., 2004) on suhteliselt kasinalt infot vetikaliikide optiliste omaduste kohta. Siiski on mõnede vetikate spektraalse peegelduse omadused avaldatud korallrahude koosluste uuringutes (Hochberg & Atkinson, 2000; Kutser et al., 2003). Mõned vetikaliikide peegeldusteguri spektrid on avaldanud näiteks Maritorena et al. (1994), Anstee et al. (2000), Wittlinger & Zimmerman (2000).

Paraku viidi need uuringud läbi selgetes ookeani (Case I) vetes. Case I veed on määratletud Moreli ja Prieuri poolt (1977) kui veed, kus peamiseks vee optiliste omaduste mõjutajaks on fütoplankton. Enamik hõljuvainest ja orgaanilisest ainest (CDOM) sellistes vetes on fütoplanktoni laguproduktid ja nende konstsentratsioon on korrelatsioonis fütoplanktoni hulga (väljendatakse üldjuhul klorofüll a kontsentratsioonina). Seega saab selliste vete omadusi kirjeldada vaid ühe parameetriga – klorofüll-a (kui fütoplanktoni põhilise pigmendi) kontsentratsiooniga.

Läänemere vesi on suhteliselt hägune ja optiliselt palju keerukam. Enamik optiliselt aktiivsetest ainest Läänemeres on maapealse päritoluga ja seetõttu ei ole nende kontsentratsioon korrelatsioonis fütoplanktoni hulga. Enamik heljumist (tahked orgaanilised ja anorgaanilised osakesed) Läänemere rannikuvetes on samuti pärit maismaalt ning selle kontsentratsioon ei ole sõltuv klorofüll-a kontsentratsioonist. Läänemere vetes on sageli domineeriv värvust omav lahustunud orgaaniline aine (CDOM – *coloured dissolved organic matter*), mille hulk ei ole samuti korrelatsioonis klorofüll-a kontsentratsiooniga. Suur

vee sissevool jõgedest, piiratud veevahetus teiste meredega ning suhteliselt madal merepõhi mõjutab oluliselt Läänemere optilisi omadusi.

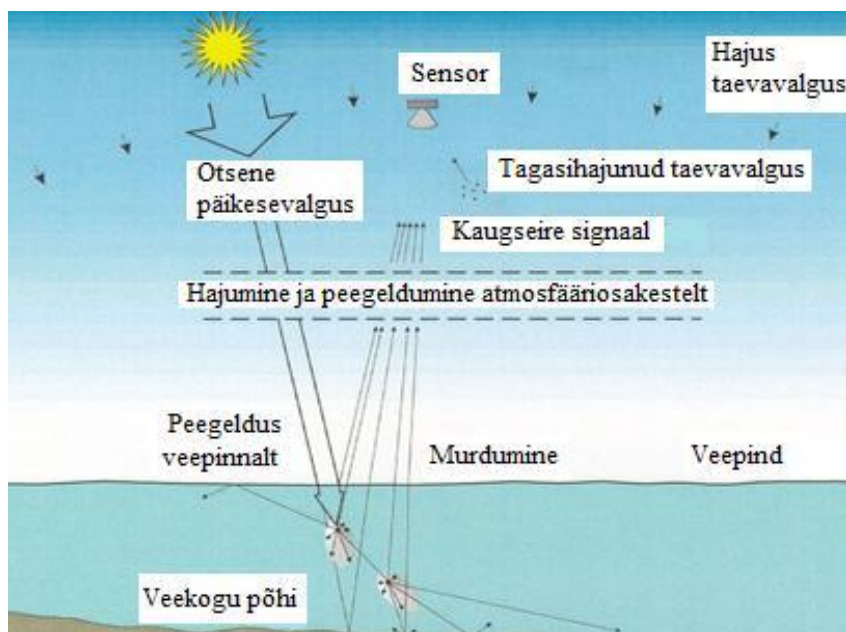
Teiseks probleemiks kaugseire meetodite kasutamisel merepõhja kaardistamisel on puudulik informatsioon Läänemere põhjataimestiku optiliste omaduste kohta. Mõningad põhjataimestiku heleduskoefitsientide spektrid on avaldatud Kutser et al. 2006 artiklis.

Käesoleva töö eesmärgiks on (1) tutvuda veekaugseire üldiste põhimõtete ja satelliidisensor Landsati parameetritega; (2) rakendada satelliidipiltidele eeltöötlus ning klassifitseerida madalad merealad taimestikuga ja taimestikuta aladeks; (3) uurida tulemite põhjal Eesti rannikumere põhjataimestiku katvuse ruumilist ja ajalist muutlikkust.

1 Veekaugseire põhimõte

Kaugseire on teadus objektist, piirkonnast või nähtusest info kogumiseks ja salvestamiseks mõõteaparatuuriga, mis pole uuritava objektiga füüsilises kontaktis (Lillesand & Kiefer, 1999). Kaugseire sensori poolt salvestatud info on mõõdetud elektromagneetilise kiirgusena või objektilt peegeldunud energiana. Kaugseire jaguneb aktiivseks ja passiivseks. Esimesel juhul kasutatakse tehiskliku kiirgusallikat (laser, radar) ning teisel juhul kasutatakse kiirgusallikana päikest. Vesi neelab kiirgust väga tugevalt peaaegu kõigil lainepikkustel välja arvatud nähtava valguse piirkond. Näiteks radarikiired ei suuda vette tungida sügavamale kui mõni millimeeter. Seepärast saab vees leiduvate ainete ja/või põhjataimestiku omaduste kohta kaugseire abil andmeid koguda ainult kasutades nähtava valguse lainepikkusi (Bukata, 2005). Lidarsüsteemid on äärmiselt kallid ning nende abil uuritava ala on väike kuna kasutada saab ainult lennukitel või helikopteritel paikevaid seadmeid. Suurte merealade kaardistamiseks on seepärast sobivaim passiivne optiline kaugseire, mida on ka antud töös kasutatud.

Vee kohal kaugseire sensorini jõudnud kiirgusvoog koosneb neljast komponendist (Joonis 1): kiirgusest, mis on tagasi hajunud atmosfääriosakestel (gaaside molekulid, tahked osakesed); kiirgusest, mis on peegeldunud veepinnalt; kiirgusest, mis on tagasi hajunud veesambas; ning kiirgusest, mis on peegeldunud veekogu põhjast (eeldades, et veekogu on piisavalt madal ja vesi piisavalt läbipaistev) (Sathyendranath, 2000).



Joonis 1. Vee kohal kaugseire sensori poolt mõõdetava kiirguse komponendid.

Madalate veekogude puhul võib kaugseire poolt mõõdetavat signaali (vee värvust) mõjutada põhjast tagasihajunud kiirgus, mis iseloomustab põhjareljeefi (vee sügavust) ja bentilist elustikku (IOCCG, 2000). Sensorisse jõudev signaal sõltub suures osas kiirguse hajumisest atmosfääris. Isegi pilvevabal päeval, kui veekogu kohal leidub mitmesuguseid veest lähtuvat kiirgust modifitseerivad aerosooliosakesi, võib atmosfääris tagasihajunud kiirguse osa ületada 90% vee kohal mõõdetud kiirgusest. See osa mõõdetud kiirgusest ei anna meile mingit informatsiooni ei merepinna, veesamba ega merepõhja omaduste kohta ning tuleb signaalist eemaldada. Atmosfäärist tingitud mõju üritavad elimineerida atmosfäärikorrektsooni algoritmid (IOCCG, 2010). Ranniku ja sisevete puhul ei saa kasutada avamere atmosfäärikorrektsoonis kasutatavaid eeldusi (näiteks veest tuleva signaali puudumine infrapunases spektriosas). Seepärast on atmosfäärikorrektsoon ranniku- ja sisevete kohal kogutud kaugseire piltidele seni veel lahendamist vajav probleem. Ranniku lähedal segab vee kaugseiret ka naabrusefekt. Kuna vesi neelab enamusel lainepikkustel peaaegu kogu sellele langeva kiirguse, siis on see kosmosest vaadates sisuliselt must. Maismaa selle kõrval on aga suhteliselt hele objekt. Maismaalt hajub kiirgus tagasi igas suunas ning osas sellest hajub ka vee kohale. Kahe objekti suure heleduste erinevuse tõttu võib päris suur osa veepinna kohal mõõdetud kiirgusest olla tegelikult pärit naabruses olevalt maismaalt.

Bentilise elustiku uurimisel moodustab kasulik signaal vaid murdosa sensorini jõudvast signaalist. Jooniselt 1 on näha, et ainult kaks nendest neljast kiirgusvoo komponendist sisaldavad informatsiooni veealuse valgusvälja kohta, aga ainult viimane komponent annab infot bentilise elupaiga tüübi kohta. Teised kolm komponenti moodustavad „müra“, mis tuleb eemaldada, kui oleme huvitatud põhjataimestiku kaardistamisest (Bukata et al., 1995).

1.1 Optiliselt aktiivsed ained

Kaugseire signaali mõjutavad optiliselt aktiivsed ained (*optically active substance*, OAS), mille hulka kuuluvad fütoplankton, värvunud lahustunud orgaaniline aine (CDOM) ja heljum. Optiliselt aktiivsed ained neelavad või hajutavad vette jõudnud kiirgust neile omasel viisil, kujundades veepinna kohal mõõdetud peegeldusspektrit.

Fütoplankton ehk taimne hõljum hõlmab erineva suurujaotusega vetikakooslusi, mis domineerivad ülemises valgustatud veekihi (Lalli & Parsons, 1994). Fütoplanktoni hulga

hindamisel lähtutakse fotosünteerilise pigmendi klorofüll-a (Chl-a) kontsentratsioonist (Moses et al., 2009). Klorofüll-a kaks neeldumisspektri maksimumi paiknevad lainepikkustel 440 ja 675 nm (Laanen, 2007). Lisaks kõigis fütoplanktoni rakkudes leiduvale klorofüll-a'le võib seal leiduda veel mitmeid teisi pigmente, mis neelavad valgust erinevatel lainepikkustel. Näiteks suvel Läänemeres õitsenguid põhjustavad tsüanobakterid (sinivetikad), sisaldavad fükotsüaniini, mis neelab valgust 630 nm piirkonnas. Fütoplanktoni rakkudes leiduvad pigmendid neelavad valgust, aga fütoplanktoni rakud ise hajutavad valgust. Seega mõjutab fütoplankton nii vee neelavaid kui hajutavaid omadusi.

Lahustunud orgaanilise aine (*dissolved organic matter*, DOM) hulka ja tüüpi käsitletakse olulise füüsikalis-keemilise veeparameetrina, mis näitab nii looduslike kui tehislake orgaaniliste lisandite hulka vees. Selle optiliselt aktiivset osa nimetatakse värvunud lahustunud orgaaniliseks aineks (*coloured dissolved organic matter*, CDOM). Fütoplanktoni lagunemise käigus tekib autohtoonne ehk veekogus tekkinud CDOM. Läänemeres ja Eesti järvedes domineerivad jõgede või tulvavetega sissekantud ehk allohtoonset päritolu humiinained. Mõlemat tüüpi värvust omavad lahustunud orgaanilised ained neelavad valgust tugevasti ultravioletses ning sinises spektriosas ning neeldumine väheneb eksponentsiaalselt lainepikkuse kasvuga (Laanen, 2007). Seepärast annavad need ained veele kollaka või pruunika varjundi. Seetõttu nimetatakse neid ka lihtsalt kollaseks aineks (*yellow substance*, *gelbstoffe*) (IOCCG, 2000; Laanen, 2007). Läänemeres ning metsavööndi järvedes on CDOM ja kogu lahustunud orgaanilise aine hulk omavahel tugevas korrelatsioonis ning hinnates kaugseire abil CDOM'i kontsentratsiooni saame hinnata kogu lahustunud orgaanilise aine hulka vees. Kollase aine molekulid lagunevad vees suhteliselt kiiresti päikesevalguse toimel (fotoooksüdatsioon) ning need on toitaineiks ka bakteritele. Tänu kollase aine juurdevoolule ei muutu Läänemere ega pruunide järvede vesi siiski kiiresti sinisemaks. Kollase aine valgust hajutav mõju on kaugseire seisukohalt tühine. Seepärast käsitletakse seda kui valgust neelavat materjali.

Heljum (*total suspended matter*, TSM) koosneb vees leiduvatest kiirgust hajutavatest orgaanilistest ja anorgaanilistest osakestest (IOCCG, 2000). Heljum satub veekokku madalates rannikuvetes põhjasetetest lainete ja hoovuste mõjul, kuid pärineb ka mitmetest maapealsetest allikatest (setete transport jõgede kaudu, kaldaerosioon). Seepärast esineb neid aineid eelkõige rannikulähedastes veekogudes ning sügavates ookeanivetes võib heljuvaine mõju üldiselt arvestamata jätta (Jensen, 2007). Heljum hajutab rohkem valgust kui neelab. Nii

neeldumis- kui hajumiskoeffitsient on suhteliselt sirged spektraalsed funktsioonid (kas täitsa lainepikkusest sõltumatud või kergelt kahanevad lainepikkuse kasvuga) (Laanen, 2007).

1.2 Madalate vete kaugseire

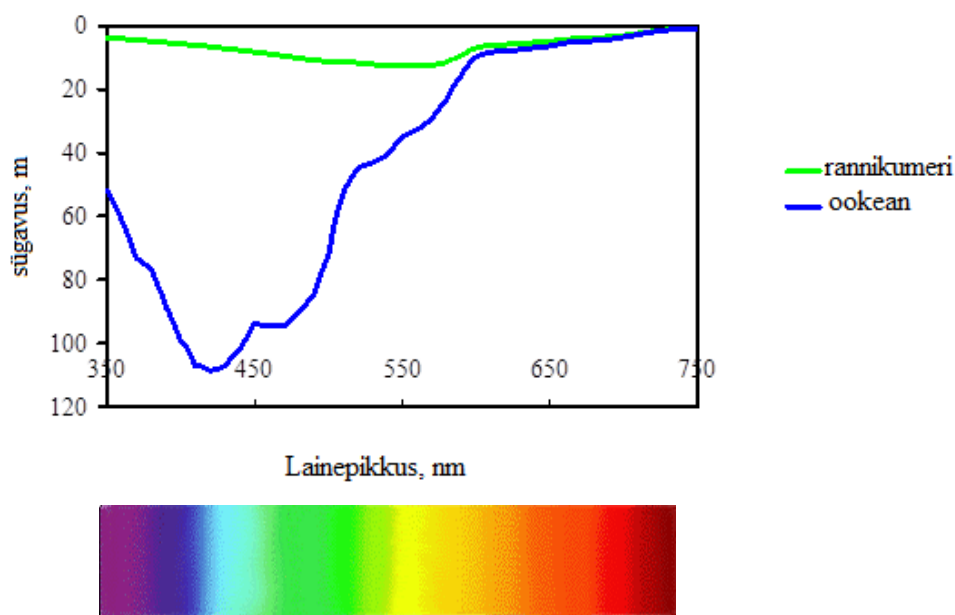
Madalates vetes, kus sügavus on palju väiksem kui valguse potentsiaalne läbistamise teekond, jõuab mingi osa valgusest veekogu põhja, neeldub seal osaliselt ning osaliselt peegeldub tagasi veepinna suunas. Põhjast peegeldunud spektri suuruse ja kuju põhjal saab teha hinnanguid põhja komponentide optiliste omaduste kohta (Werdell & Roesler, 2003).

Kui selgetes ookeanivetes mõjutab merepõhjast tulevat signaali eelkõige valguse neeldumine ja hajumine vee molekulidel ning vähene kogus fütoplanktonit, siis hägustes rannikuvetes vähendavad fütoplanktoni ja mineraalsete osakeste tõttu tekkiv spektraalne hajumine ja neeldumine, ning lahustunud orgaanilise aine poolt põhjustatud neeldumine tugevasti valguse hulka, mis jõuab veekogu põhja ja saab sealt peegelduda (Dekker et al., 1992). Seega maksimaalne sügavus, kuhu valgus paistab, sõltub vee läbipaistvusest. Hägustes rannikuvetes, kus vees leiduvate optiliselt aktiivsete ainete hulk on väga suur ja sügavus, kuhu valgus paistab, on ainult meeter või vähemgi, ei ole põhi nähtav ja sellel ei ole mõju kaugseire abil mõõdetavale peegeldumisspektrile.

Sügavus, kuhu valgus madalates vetes jõuab, ei sõltu ainult optiliselt aktiivsete ainete hulgast vees vaid ka veekogu põhja sügavusest ja selle omadustest (Ackleson, 2003). Veekogu põhjast tulev spekter on tugevalt sõltuv vee sügavusest, sest signaali tugevus ja sügavus on omavahel pöördvõrdelises seoses. Mudelarvutused ja mõõtmised, mis uurivad veesamba mõju merepõhjast tulevale signaalile näitavad, et valgusvoo nõrgenemine veesambas on väga kiire (Wittlinger & Zimmermann, 2000). Valguse läbitungimisvõime sõltub lainepikkusest ning on ookeanivetes suurem sinistel lainepikkustel (400 nm) kui punastel lainepikkustel (600 nm) (Mumby et al., 2003). Lahustunud orgaanilise aine rikastes vetes nagu Läänemeri on maksimaalne läbivus rohelistel lainepikkustel. Punaste lainepikkuste neeldumine on tingitud põhiliselt vee molekulidest ja on seetõttu suhteliselt sarnane nii puhastes kui hägustes vetes, kuid ranniku- ja sisevetes neelavad fütoplankton ja lahustunud orgaanilised ained väga tugevasti sinises spektriosas. Erinevates maailma piirkondades tehtud spektraalsed mõõtmised (Anstee et al., 2000; Dekker et al., 2001; Kutser et al., 2002; Hochberg & Atkinson, 2000,

2003: Karpouzil et al., 2004) näitavad, et põhilised erinevused merepõhja tüüpide vahel on punases spektriosas.

Karakteristik, mis iseloomustab kui sügavalt veest valguse footonid tagasi pinnale jõuavad (ja järelkult on tuvastatavad ka kaugseire sensorite poolt) on läbimissügavus (*depth of penetration*, DOP) Lääbimissügavus on pöördvõrdeline vee sumbumiskoeffitsiendiga. Kaks DOP spektrinäidist on näidatud Joonisel 2.



Joonis 2. DOP spektrid rannikuvetes ja ookeanivetes.

Pikematel lainepikkustel erinevad DOP'id rannikuvetes ja puhastes ookeanivetes vähe. Vee molekulide tugeva neelamisvõime tõttu (kasvab punases spektriosas eksponentsiaalselt) on aga valguse läbimissügavus nendel lainepikkustel vaid 5-6 meetrit nii selgetes ookeanivetes kui ka puhtamates Läänemere osadest (vt. Joonis 2).

Kokkuvõtvalt, vee hägunemine (vees leiduvate lisandainete hulga tõus) ja sügavuse suurenemine suurendab veesambast tagasi hajunud footonite hulka põhjast peegeldunute suhtes, vähendades põhjast peegeldunud voo mõju veepealses spektris (Carder et al., 2003).

2 Veekogude optiline klassifikatsioon

Case I ja *Case II* veekogude klassifikatsiooni konseptsiooni, mis põhineb optiliselt aktiivsete ainete kontsentratsioonil ja panusel veesamba spektraalsetesse omadustesse, tutvustasid esmakordselt André Morel ja Louis Prieur (1977). Olukorras, kus veesensorid ja väljatöötatud algoritmid suudavad anda üha täpsemat informatsiooni seiratavate objektide, sealhulgas ka optiliselt keerukamate ranniku- ja siseveekogude kohta, muutub piiri tõmbamine kahe klassifikatsioonitüübi vahel keerukaks.

Case I tüüpi kuuluvad veekogud, mille optilised omadused on määratud vee molekulide, fütoplanktoni ning selle laguproduktide poolt. Lisaks selgeveelistele ja sügavatele ookeanidele võib termin laieneda ka üksikutele sise- ning rannikuvetele (Bukata, 2005). *Case I* veekogude optilisi omadusi modelleeritakse funktsioonina klorofüll-*a* kontsentratsioonist eeldustel, et selle pigmendi hulk kirjeldab fütoplanktoni kontsentratsiooni ning teiste optiliselt aktiivsete ainete kontsentratsioonid on korrelatsioonis klorofüll-*a* hulgaga (IOCCG, 2000).

Case II tüüpi veekogude optilisi karakteristikuid mõjutavad kolm üksteisest sõltumatut muutujat: fütoplankton, värvust omav lahustunud orgaaniline aine ja heljum. Madalates veekogudes on mõjutajaks ka põhjast tagasihajunud kiirgus (IOCCG, 2000). *Case II* hõlmab enamuse sise- ja rannikuveekogusid ning ookeanide ja merede vahelist üleminekuala (Bukata, 2005). Enamustel lainepikkustel mõjutavad kaks või kolm ainet samaaegselt veest lähtuvat signaali. Seetõttu on raske või lausa võimatu eristada iga optiliselt aktiivse aine mõju kaugseire signaalis. Nagu eelpool mainitud eeldab rannikuvete uurimine ühtlasi ka keerukamat atmosfäärikorrektsiooni (IOCCG, 2000).

Esmapilgul lihtne jaotus põhjustab pigem segadust, väärtarvitust ja mitmetähenduslikkust. Lahendusena nähakse *Case I*, *Case II* terminite põhjalikku ümbersõnastust või nendest loobumist, keskendudes konkreetsete veekogude modelleerimisele ja algoritmide väljatöötamisele vastavalt OAA-de lokaalsele mõjule (Mobley et al, 2003).

3 Satelliitsensorid veekogude kaugseireks

Veest lähtuv signaal on võrreldes maapinna peegeldusteguriga nõrk kuna vesi neelab kiirgust väga tugevalt kõigil lainepikkustel. Taimkatte seireks mõeldud sensorid ei ole piisavalt tundlikud selliste väikeste energiahulkade mõõtmiseks ega anna seepärast piisavalt häid tulemusi veekogudes toimuvate protsesside ja nende muutuste seirel. Sealjuures on nii signaali vastuvõtmine kui ka esmane töötlemine veekogude puhul töömahukamad. Kiirguse hajumine atmosfääris on kordades intensiivsem kui veekogus hajunud ja ülesuunduv kiirgus, mistõttu tuleb arvestada ka keerukama atmosfäärikorrektsiooniga. Rannikuvete korral mõjutavad peegeldustegurit ka kaldapiirkonnad – osa vee kohal mõõdetud kiirgusest on tegelikult tagasi peegeldunud maa kohalt. Kuna veest tulev signaal on väga nõrk, siis on kalda lähedases signaalis maapinnalt peegeldunud kiirguse osakaal tuntav. Kõike seda arvesse võttes on veeseireks sobilike sensorite hulk piiratud.

Enamus vee kaugseireks ehitatud satelliitidest (CZCS, SeaWiFS, MODIS, MERIS) on ehitatud nii, et oleks võimalik paari kolme päeva jooksul koguda infot kogu maakera kohta. Seepärast on nende satelliitide ruumiline lahutus tavaliselt 1 km suurusjärgus. MERIS oli rohkem kohandatud rannikuvete jaoks ning sellega sai lisaks 1200 m ruumilisele lahutusele koguda infot ka täislahutusega režiimis, kus piksli suuruseks oli 300 m. Teoreetiliselt oleks MERIS spektraalne lahutus sobilik erinevate merepõhja tüüpide kaardistamiseks (Vahtmäe et al., 2006), aga kuna põhjataimestiku ruumiline varieeruvus on enamasti väga suur, siis MERIS oma 300 m ruumilise lahutusega põhjataimestiku kaardistamiseks ei sobi.

Käesoleval ajal on olemas ka väga hea ruumilise lahutusega satelliite: IKONOS (4 m lahutus), QuickBird (2,4 m lahutus), WorldView-2 (2 m lahutus) ning lennukitel paiknevad sensorid (AISA, CASI, HySpex), mille piksli suurus sõltub lennukõrgusest. Nende satelliitide ja sensoritega saab samuti kaardistada nii merepõhja tüüpi kui erinevaid vee kvaliteedi parameetreid. Kuna kõrglahutusega satelliitide puhul on tegu kommertssatelliitidega saab pilte ainult siis, kui konkreetsest kohast tellida. Ka on need pildid suhteliselt väikesed (umbes 15x15 km). Piisavate rahaliste võimaluste olemasolul saab kaardistada ka suuremaid alasid ning aastate jooksul võib koguda piltide aegrea muutuste tuvastamiseks ja uurimiseks. Samas ajas tagasi minemiseks ei ole neid sensoreid võimalik kasutada. Kui põhjataimestiku uurimiseks ei ole tehtud välitöid (neid on tehtud vähe) ega ole tellitud suure lahutusega satelliitide pilte, siis ei jää muutuste uurimiseks muud varianti kui Landsat.

Landsat ei ole küll spektraalse ja ruumilise lahutuse poolest optimaalne valik, kuid tegemist on ainukese satelliidiga, mille aegread on piisavalt pikad muutuste jälgimiseks. Samuti on satelliitpildid kasutajale andmebaasist alla laadimiseks tasuta. Ehkki antud töö eesmärgiks on uurida vaid põhjataimestiku katvuse muutusi viimastel aastakümnetel, annab see olulise teabe veekogude keskkonnaseisundi hindamisel, sest *in situ* mõõtmistega ei ole reaalselt võimalik selliseid protsesse uurida.

3.1 Landsat

Landsati programmi alustas Ameerika Ühendriikide Riikliku Aeronautika- ja Kosmosevalitsus (*National Aeronautics and Space Administration, NASA*), kes 23. juulil 1972 viis orbiidile esimese tvisiilotsarbelise Maad pildistava satelliidi *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS-1), mis hiljem nimetati ümber satelliidiks Landsat 1. 1983. aastal anti Landsati programm üle NOAA-le (*National Oceanic and Atmospheric Administration, USA*). Landsat seeria tehiskaaslaseid on kokku 8, millest Landsat 6 orbiidile ei jõudnudki.

Käesoleva töö raames kasutatakse satelliitide Landsat 5 ja Landsat 7 andmeid. Mõlemad tehiskaaslased liikusid mööda 705 kilomeetri kõrgust päikesesünkroonset orbiiti. Landsat 5 missioon algas 1984. aasta varakevadel ning andmete ülekanne ja side satelliidiga katkes 18. novembril 2011 (*Landsat 5 History*). Satelliit Landsat 7 saadeti orbiidile 17. aprillil 1999 ning töötab senini (*Landsat 7 History*). 2013 aasta 11. veebruaril jõudis orbiidile Landsat 8, mille tundlikkus on juba sobilik ka veekogude seireks. Esimesed andmed sellelt satelliidilt peaks hakkama tulema lähikuudel.

Kuigi veekogude kaugseireks on mitmeid satelliidisensoreid, valiti antud töö jaoks just Landsat 5 ja 7, sest vaatamata kehvale tundlikkusele on antud satelliite puhul arhiivis küllaltki pikk aegrida ning nendel satelliitidel on suhteliselt hea ruumiline lahutus – 30 meetrit. Landsat 5'l on 7 spektraalkanalit vahemikus 450-1250 nanomeetrit, Landsat 7-l on aga lisaks veel pankromaatiline kanal spektraalvahemikus 520-900 nanomeetrit (vt. Tabel 1). Mõlema satelliidi korduse tsükkel on 16 päeva. See tähendab, et täpselt samast kohast saab pildi iga 16 päeva tagant, aga piltide ülekatte tõttu meie laiuskraadil on võimalik osadest kohtadest infot saada ka poole tihedamini.

Aja jooksul on Landsati satelliitidel olevaid multispektraalseid skannereid palju edasi arendatud. Esimeste Landsati satelliitide skannerit nimetati *Multi-Spectral Scanner*’iks (MSS) ning selle pilte salvestati enam kui 20 aasta vältel. Sellel multispektraalsel skanneril oli vaid neli spektripiirkonda (Landsat *Technical Details, The Multispectral Scanner System*) ning ruumiline lahutus oli 100 m. Landsat 4 ja Landsat 5 põhiinstrumendiks oli multispektraalne skanner *Thematic Mapper* (TM), millel oli 7 spektripiirkonda (Landsat *Technical Details, The Thematic Mapper*). *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) on satelliidi Landsat 7 skanner, millel on spektri nähtavad ja infrapunases piirkonnas mõõtev pankromaatne kanal ning kokku 8 spektripiirkonda (Landsat *Technical Details, The Enhanced Thematic Mapper Plus*).

Sensor	TM	ETM+
Ruumiline lahutus	30 m	30 m
Spektraalkanalite arv	7	8
Korduse tsükkel	16 päeva	16 päeva
Skaneerimisulatus	185 km	183 km
Kanal 1	0,45-0,52 μm	0,45-0,515 μm
Kanal 2	0,52-0,60 μm	0,525-0,605 μm
Kanal 3	0,63-0,69 μm	0,630-0,69 μm
Kanal 4	0,76-0,90 μm	0,75-0,90 μm
Kanal 5	1,55-1,75 μm	0,75-0,90 μm
Kanal 6	10,4-12,5 μm	10,4-12,5 μm
Kanal 7	2,08-2,35 μm	2,09-2,35 μm
Kanal 8	-	0,52-0,9 μm

Tabel 1. Landsati tehnilised andmed.

4 Uuritavate alade kirjeldused

Eesti rannikumeri on jaotatud füüsikalis-ökoloogilistest tingimustest lähtudes 16-ks veekogumiks. Ökoloogilise kvaliteedi hindamisel ei vastanud ükski veekogum klassi „väga hea“ nõuetele, klassi „hea“ kuulusid 4 veekogumit, klassi „kesine“ 9 veekogumit ning halvaks hinnati ainsana Haapsalu lahe rannikuvee seisund (Keskkonnateabe Keskus). Haapsalu laht ja Väike väin on toitaineterikkad *Case II* tüüpi veekogud, mille veesisene valgusväli sõltub tugevasti vees sisalduvatest osakestest ja lahustunud orgaanilisest ainest. Madalast sügavusest tingituna on veekogud mõjutatud tuulte ja hoovuste poolt.

4.1 Haapsalu laht

Haapsalu laht asub Lääne-Eesti rannikul Väinameres, eraldab Noarootsi poolsaart muust Eesti mandriosast. Haapsalu lahe pindala on 50 km² ning laht jaguneb Haapsalu linnast lääne pool paiknevaks Eeslaheks ning linnast kirdes asuvaks Tagalaheks. Tagalahe osadeks on Saunja ja Tahu laht ning need kuuluvad Silma looduskaitsealasse. Maakerke ja kinnikasvamise tõttu on lahe põhjasopp eraldunud järveks ning Võnnu saar liitunud Noarootsi poolsaarega. Haapsalu laht on Eesti peamisi meremudamaardlaid.

Eeslahe suurimaks sügavuseks on 4,5 m, Tagalahel aga kõigest 2 m. Madaluse ning suhteliselt suure hägususe tõttu on Haapsalu lahe vesi suvel muude Eest lahtede veest soojem, talviti võib läbikülmumine põhjustada hapnikupuudust (Eesti Entsüklopeedia).

Haapsalu laht on ainus ametlikult väga halvas seisus rannikuveekogum Eestis. Kuigi Haapsalu linna reoveed puhastatakse juba 1998. aastast nüüdisaegses puhastis on suurselgrootute seisund kesine ja veetaimestiku seisund hea, kuid nii füüsikalis-keemiliste kvaliteedielementide kui ka fütoplanktoni halva seisundi tõttu on koondhinnanguks on siiski „halb“. Lahe halva seisundi olulised põhjused on selle madalus, väike veevahetus ja setetest vabanevad toitained. Haapsalu laht on väga paljudele lindudele pesitsuspaik, mis tõstab omakorda lahe reostuskoormust (Keskkonnateabe Keskus).



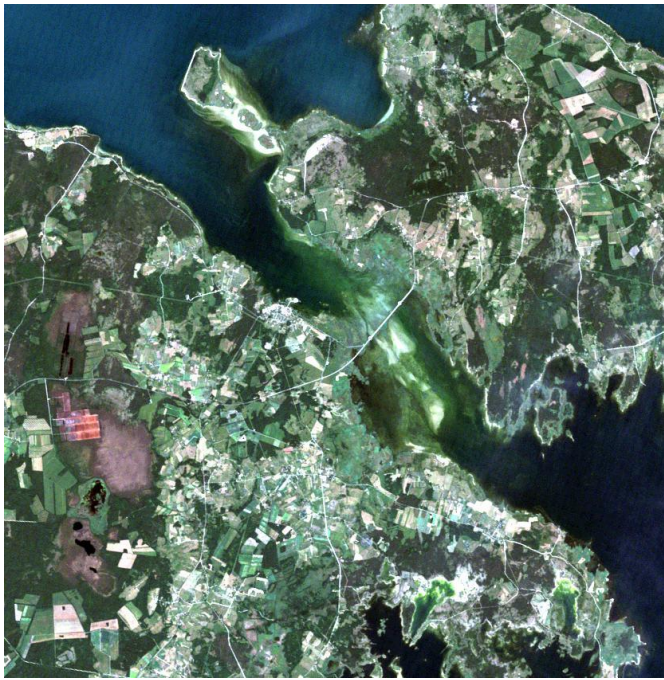
Joonis 3. Haapsalu lahe piirkond.

Haapsalu lahe piirkonna pildi kogupindala on 142,4 km².

4.2 Väike väin

Väike väin on merekitsus Muhu saare ja Saaremaa vahel ning on 2-4 km lai ning sügavus on valdavalt alla 3 m. Väin eraldab Väinamerd ja Riia lahte. Väinas on üle 20 väikese laiu ja kare, suurimad nendest on Kindlalaud (30,4 ha), Kõpussaare nasu (15,6 ha) ja Illiklaud (5,5 ha). Väikese väina esmamaining pärineb aastast 1458 (Eesti Entsüklopeedia).

Muhu saart ja Saaremaad ühendab Väinatamm, mis on rajatud 19. Sajandi üheksakümnendatel aastatel (Wikipedia). Tamm takistab vee tavapärasest liikumist ning koos väina madalusega põhjustab see kinnikasvamist. Umbes 3,5 km pikkune tamm ehitati väina ühte kõige madalamasse kohta ning tammi vajumise vältimiseks ja põhjas voolava liivsavi sidumiseks rajati selle kividest alus haokubudele. Tammi valmimine suurendas tunduvalt Kuressaare ja Kuivastu vahelise ühendustee tähtsust. Ebasoodselt mõjus avadeta ehitatud tamm kalapüügile, kuna pani kinni kalade tee kudemiskohatadele. Vee loomuliku läbijooksu sulgemine mõjutas ka Väikese väina puhtust (Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium).



Joonis 4. Väikese väina piirkond.

Väikse väina uuritava ala kogupindala on 635,0 km².

5 Materjal ja metoodika

5.1 Landsati pildid

Käesolevas töös on kasutatud Earth Resources Observation and Science Center (EROS) andmebaasist allalaetud Landsat Level 1 satelliidipilte. Kasutatud on Landsat 5 ja Landsat 7 sensorite andmeid. Pildid on ajavahemikust 1986-2011 ning kokku on alla laetud ning edasiselt töödeldud 9 pilti (vt. Tabel 2). Piltide valimise eelduseks oli esiteks see, et uuritavad alad oleks pilvevabad ning teiseks valiti pildid perioodist, kus taimkatte ulatus peaks olema maksimaalne. Kevadisi ja sügisei pilvevabu pilte ei kasutatud kuna sel perioodil võib taimestiku katvus olla väiksem. Talvised pildid ei ole kasutatavad jääkatte tõttu.

Sensori tüüp	Kuupäev
TM	10. juuni 1986
TM	09. juuli 1994
+ETM	31. juuli 1999
+ETM	19. juuli 2002
TM	02. september 2005
TM	03. juuli 2006
TM	02. juuli 2009
+ETM	27. juuni 2010
+ETM	07. juuni 2011

Tabel 2. Töö raames kasutatud piltide sensorite tüübid ja kuupäevad.

5.1.1 Landsat 7 pildid

Landsat 7 missiooni loetakse veatuks alates stardihetkest 17. aprillil 1999 kuni 31. maini 2003. Sellest päevast on riistvara rikke tõttu satelliidipiltide mõlemal küljel mustad alad, kust puudub informatsioon. Kuus nädalat peale skaneerimisjoone korrektori (*scan line corrector*, SLC) rikke avastamist jätkas satelliit globaalset maamõõtmise missiooni, jättes arhiivi vaid lühikese ajavahemiku, mille kohta satelliidipilte saadaval pole. Siiski mõjutab rike Landsat 7 satelliidipiltide kvaliteeti.

Satelliidil on instrument (*The Enhanced Thematic Mapper Plus*, ETM+) ning selle optika sisaldab lisaks teistele komponentidele skaneerimispeeglit ja skaneerimisjoone korrigeerijat. Skaneerimispeegel võimaldab risti liikumissuunalist pildistamist ning satelliidi edasiliikumine võimaldab liikumissuunalist pildistamist. Skaneerimisjoone korrigeerijat kasutatakse piltide äärtest sikk-sakk mustri eemaldamiseks, mis tekib piki ja ristisõidusuunalisel pildistamisel. Ilma korrigeerijata (peale riket) sikk-sakke ei eemaldata ja satelliidipildidel on mustad ilma infota alad.



Joonis 5. Landsat 7 pilt, mille tegemise ajal SLC ei töötanud.

Sellisel juhul, kui skaneerimisjoone korrektor ei tööta, saab ETM+ endiselt ligikaudu 75 protsenti andmetest iga konkreetse stseeni kohta. Puudulike andmete ribad laienevad pildi keskelt servade suunas. (Landsat 7 History)

Need pildid on siiski kasutatavad ning seda on tehtud ka antud töö raames (2010 ja 2011 aasta pildid). Võimaldamaks kasutada 2010 ja 2011 aasta pilte põhjataimestiku katvuse muutuste uurimisel on kõigi aastate absoluutsed katvused (taimestikuga pikselite arv) ümber arvutatud suhtelisteks katvusteks (taimestikuga pikselite arv jagatud kõigi antud ala puhul kasutatavate pikselite arvuga).

5.2 Piltide töötlemine

Töötluste teostamiseks ning piltide analüüsimiseks ja visualiseerimiseks kasutati tarkvara ENVI 4.8.

Selleks, et erinevatelt piltidelt saadav spektraalne informatsioon oleks omavahel võrreldav tuleb kõigepealt teostada radiomeetriline korrektsioon, kus numbrid teisendatakse peegeldusteguri väärtusteks.

Järgmiseks tuleb piltidele ehitada ja rakendada maamaskid, millega eemaldatakse antud uurimistöös mittevajalik osa (maismaa).

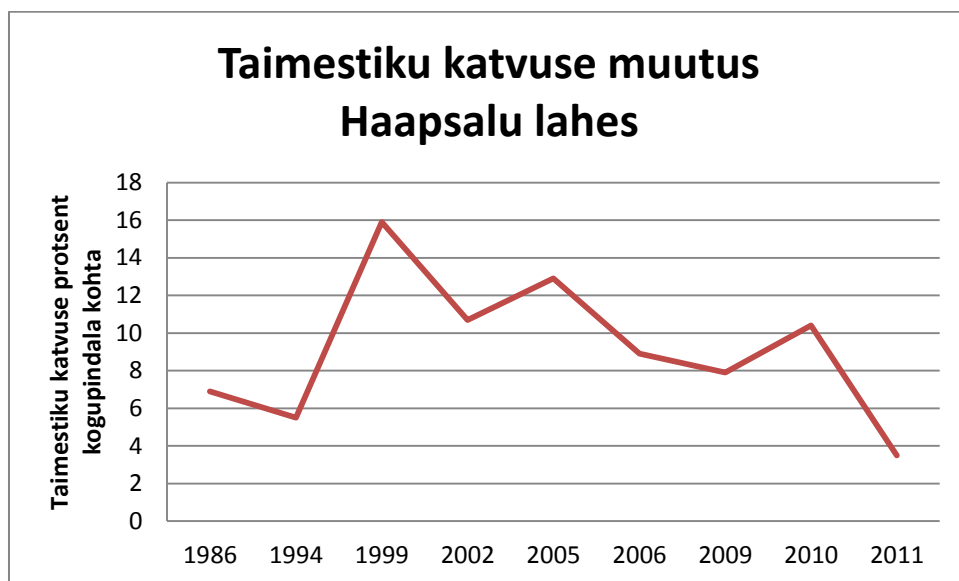
Kui piltidele on rakendatud maamaskid, saab hakata neid klassifitseerima. Antud töö raames klassifitseeriti pikslid kolmeks: taimestikuga alad, taimestikuta alad ning sogane ja sügav vesi. Klassifitseerimiseks kasutati juhendatud klassifikatsiooni (*Supervised classification*) ning selle abil moodustatakse pikslite klastrid eelnevalt kasutaja poolt määratud klastrite abil. Juhendatud klassifikatsiooni tegemiseks on ENVI's mitu võimalust: minimaalne vahemaa (*minimum distance*), maksimaalne sarnasus (*maximum likelihood*) ning spektraalse nurga kaardistaja (*spectral angle mapper, SAM*). (ENVI User Guide, *Supervised Classification*)

SAM on spektraalne klassifikatsioon, mis kasutab pikslite klassidesse määramiseks n-mõõtmelist nurka kasutaja poolt määratud klasside iseloomulike spektrite ning ülejäänud pildi pikslite spektrite vahel. Algoritm määrab spektraalse sarnasuse kahe spektri vahel arvutades spektrite vahelise nurga, käsitledes neid kui ruumivektoreid. Mida väiksem on nurk, seda sarnasemad spektrid on. (ENVI User Guide, *Spectral Angle Mapper Classification*)

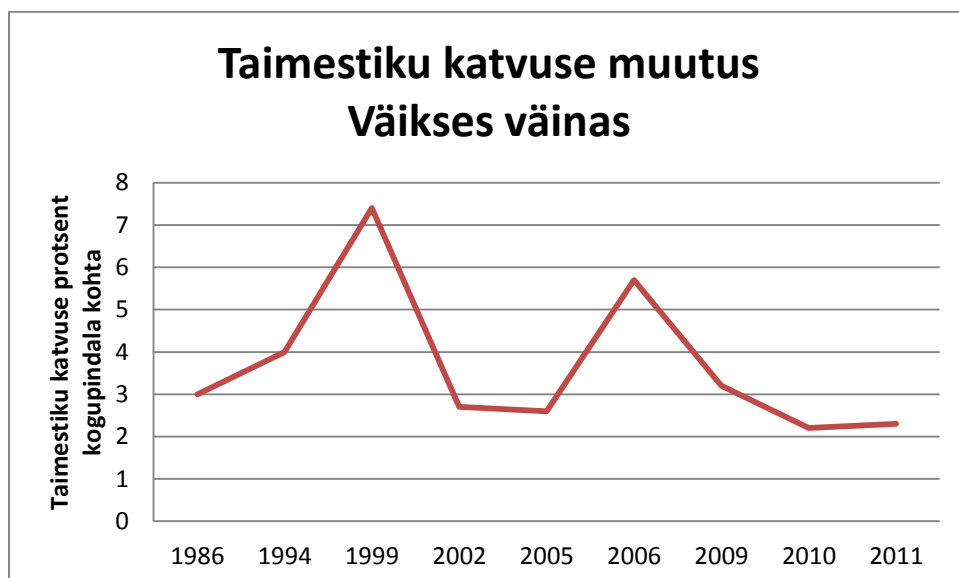
Peale klassifitseerimist ning klasside kombineerimist oli piltidel näha neli klassi: taimestikuga alad, taimestikuta alad, optiliselt sügav vesi ning maskitud alad. Seejärel ehitati piltidele peale uued maskid ning seekord maskiti välja kõik peale taimestikuga alade. Selleks, et pildid oleks

omavahel võrreldavad alad lõigati kõikidest pildidest täpselt ühesuurused failid uuritavatest piirkondadest (Haapsalu laht ja Väike väin).

6 Tulemused



Joonis 6. Taimestiku katvuse muutus Haapsalu lahes.



Joonis 7. Taimestiku katvuse muutus Väikses väinas.

Joonistel 6 ja 7 on kujutatud taimestiku suhtelise katvuse muutused aastatel 1986 kuni 2011 Haapsalu lahes ning Väikses väinas. Nagu näha, on katvuse ajaline muutus kahes piirkonnas olnud erinev. Sarnast on vaid nii palju, et maksimum oli põhjataimestiku katvuses 1999 aastal. Kui Haapsalu lahes on seejärel näha kahanemist põhjataimestiku katvuses, siis

Väikeses väinas võib täheldada suhteliselt ühtlast katvust millest eristuvad kaks tunduvalt suurema põhjataimestiku katvusega aastat: 1999 ja 2006.

TÜ Eesti Mereinstituudis ning selle eelkäijates on kogutud põhjataimestiku proove mõlemal uuritud alal. Kuna tegu on üksikute punktmõõtmistega, siis on nende põhjal väga raske saada informatsiooni, mis oleks kasutatav Landsati piltidelt saadud informatsiooni valideerimisel. Punktmõõtmiste tulemustest oleks näiteks võimalik kasutada katvust mõõtepunktides või ka biomassi, aga mõlemad on võimalik leida väga piiratud pindala (umbes ruutmeeter või vähem) kohta. Need seirepunktid võisid juhuslikult sattuda kohtadesse kus aja jooksul muutusi praktiliselt ei esinenud – näiteks praktiliselt taimestikuta liivasele alale. Isegi kui erinevatel aastatel õnnestud külastada sama mõõtepunkti väga suure täpsusega, mis on praktiliselt võimatu, siis ei pruugi muutused selles punktis kajastada muutusi kogu uuritava alal. Seega annab Landsati piltide kasutamine meile unikaalset informatsiooni madalatel rannikualadel toimuvatest protsessidest, mida teiste meetoditega on väga keeruline saada.

Enamuse põhjataimestikust uuritavatel aladel moodustavad üheaastased liigid. Nende hulka määravad nii füüsikalised häiritused (jää, tormid) kui vee toitainetesisaldus. Näiteks võib jää liikumine „puhastada“ merepõhja niivõrd, et ka vee suure toitainetesisalduse ja sobiva ilmastiku korral jääb maksimaalne katvus väiksemaks kui madala toitainetesisaldusega, aga ka madala jää purustava mõju puhul. Samuti võib põhjataimestiku katvust oluliselt muuta mõni tugevam torm. Samas on mõlemad uuritud merealad suhteliselt hästi kaitstud tormide purustava mõju eest.

Käesolev töö on esimeseks katsetuseks tegemaks kindlaks kas meil on võimalik uurida põhjataimestiku katvuse muutusi suurematel merealadel pikema aja jooksul. Nagu näha joonistelt 6 ja 7 on see Landsati piltide abil teostatav. Selle tõestamine oligi käesoleva töö eesmärgiks. Järgmise sammuna peaks võtma kõik saadaolevad *in situ* mõõtmiste andmed (põhjataimestiku katvus, biomass, toitained) TÜ Eesti Mereinstituudi andmebaasist, andmed jääkatte kohta erinevatel talvedel (neid saab samuti kaugseire, näiteks satelliidi MODIS, piltidelt) ning muud andmed (näiteks meteoroloogilised) ja püüdma tuvastada millest on tingitud muutused põhjataimestiku katvuses nendel kahel merealal. See on aga uue ja komplekssema uurimistöö teemaks.

7 Kokkuvõte

Käesoleva töö eesmärgiks oli testida satelliidiandmete kasutatavust põhjataimestiku katvuse ajalis-ruumilise muutlikkuse tuvastamiseks hägusates rannikuvetes. Uurimistöö tulemused näitavad, et kuigi senised Landsat seeria satelliidid ei ole ehitatud veekeskkonna kaugseireks on neid pilte siiski võimalik kasutada põhjataimestiku olemasolu tuvastamiseks ehk klassifitseerimaks uuritavaid alasid kahte klassi: taimestikuga ja taimestikuta alad. Selline informatsioon võimaldab meil jälgida taimestiku katvuse muutusi aastakümnete jooksul kuna Landsat TM ja ETM+ sensorite andmed on olemas aastast 1986. Selliste protsesside uurimine *in situ* meetoditega on praktiliselt võimatu.

Põhjataimestiku katvus kahel uuritud alal muutus aastatel 1986-2011 erinevalt. Ainus sarnasus kahe uuritava piirkonna vahel oli katvuse maksimum aastal 1999. Millest tulenes maksimum sel aastal ning miks on katvuse ajalis-ruumilised muutused uuritud piirkondades erinevad vajab eraldi uurimistööd kaasates nii merebioloogia kui kaugseire spetsialiste.

Tänuavaldused

Autor avaldab tänu Tiit Kutserile käesoleva töö juhendamise ja meeldiva koostöö eest. Kiire tagasiside, igakülgne abi ja soovitusel tegid võimalikuks bakalaureusetöö sujuva valmimise.

Täna Ele Vahtmäed, kes abistas mind satelliidipiltide töötlemise õppimisel.

8 Detecting long time changes in benthic algae cover using Landsat image archive

Laura Lõugas

Summary

The main purpose of this Bachelor's thesis was testing whether Landsat series satellites can be used for mapping shallow water benthic algae cover and changes in it in such optically complex environment like coastal waters of the Baltic Sea. The results indicate that although the previous Landsat satellites have not been built for water remote sensing, they are still suitable for detecting the benthic algae cover by classifying bottom into two classes: areas with bare substrate and areas with benthic algae. This information allows us to monitor changes in benthic algae coverage through decades since the Landsat TM and ETM+ sensors data is available since 1986. This information is unique as it cannot be collected by means of *in situ* measurements.

The benthic algae cover varied differently in the two study sites between 1986 and 2011. The only similarity is the maximum in algal coverage in 1999. What caused the maximum this year and why is the spatial variability different in the study areas, needs a separate study involving marine biology and remote sensing specialists.

Kasutatud kirjandus

- Anstee, J., Dekker, A., Byrne, G., Daniel, P., Held, A., Miller, J. (2000). Use of hyperspectral imaging for benthic species mapping in South Australian coastal waters. 10th Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference, Adelaide, 1051-1061.
- Barale, V., Folving, S. (1996). Remote sensing of coastal interactions in the Mediterranean region. *Ocean & Coastal Management*, 30, 217-233.
- Bukata, P. R., (2005). Satellite monitoring of inland and coastal water quality: retrospection, introspection, future direction. Taylor and Francis Group, Boca Raton, 5-60 pp.
- Dekker, A.G., Brando, V.E., Anstee, J.M., Pinnel, N., Kutser, T., Hoogenboom, E.J., Peters, S., Pasterkamp, R., Vos, R., Olbert, C., Malthus, T.J.M. (2001). Imaging spectrometry of water. In: *Imaging Spectrometry: Basic principles and Prospective Applications* (Eds. F. D van der Meer, S. M. De Jong), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Eesti Entsüklopeedia, http://entsyklopeedia.ee/artikkel/haapsalu_laht1, 14.03.2013
- Eesti Entsüklopeedia, http://entsyklopeedia.ee/artikkel/v%C3%A4ike_v%C3%A4in2, 14.03.2013
- ENVI User Guide, *Spectral Angle Mapper Classification*, http://geol.hu/data/online_help/ApplyingSpectralAngleMapperClassification.html, 10.04.2013
- ENVI User Guide, *Supervised Classification*, http://geol.hu/data/online_help/Supervised_Classification.html, 10.04.2013
- Fyfe, S. K. (2003). Spatial and temporal variation in spectral reflectance: Are seagrass species spectrally distinct? *Limnology and Oceanography*, 48, 464-479.
- Hochberg, E. J., Atkinson, M. J. (2000). Spectral discrimination of coral reef benthic communities. *Coral Reefs*, 19, 164-171.
- Hochberg, E. J., Atkinson, M. J. (2003). Capabilities of remote sensors to classify coral, algae, and sand as pure and mixed spectra. *Remote Sensing of Environment*, 85, 174-189.

- IOCCG, (2000). Remote sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. Sathyendranath, S. (Ed.). Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, nr. 3 IOCCG, Dartmouth, 5-46 pp.
- Jensen, John R., (2000). Remote sensing of the environment. An earth resource perspective. Second edition. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 409-439 pp.
- Karpouzil, E., Malthus, T. J., Place, C. J. (2004). Hyperspectral discrimination of coral reef benthic communities in western Caribbean. *Coral Reefs*, 23, 141-151.
- Keskkonnateabe Keskus, <http://www.keskkonnainfo.ee/failid/ky/vesi.pdf>, 14.03.2013
- Kutser, T., Jupp, D. L. B. (2002). Mapping coral reef benthic habitat with a hyperspectral space borne sensor. Proc Ocean Optics XVI, Santa Fe, CD-ROM.
- Kutser, T., Dekker, A. G., Skirving, W. (2003). Modeling spectral discrimination of Great Barrier Reef benthic communities by remote sensing instruments. *Limnology and Oceanography*, 48, 497-510.
- Kutser, T., Vahtmäe, E., Metsamaa, L. (2006). Spectral library of macroalgae and benthic substrates in Estonian coastal waters. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 55, 329–340
- Laanen, L. M., (2007). Yellow Matters – Improving the remote sensing of Coloured Dissolved Organic Matter in inland freshwaters. Vrije University, Amsterdam, 6-32 pp.
- Lalli, M. C., Parsons, R. T., (1994). Biological Oceanography: An Introduction. Pergamon, Vancouver, 45-60 pp.
- Landsat 5 History, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat5.html>, 11.03.2013
- Landsat 7 History, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat7.html>, 11.03.2013
- Landsat Technical Details, The Enhanced Thematic Mapper Plus, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/etm+.html>, 12.04.2013
- Landsat Technical Details, The Multispectral Scanner System, <http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/mss.html>, 12.04.2013.

Landsat *Technical Details, The Thematic Mapper*,
<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/tm.html>, 12.04.2013

Majandus- ja kommunikatsiooniministeerium, <http://www.mkm.ee/8686/>, 14.03.2013

Maritorena, S., Morel, A., and Gentili B. (1994). Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: Influence of water depth and bottom albedo. *Limnology and Oceanography*, 37, 1689-1703.

Minghelli-Roman, A., Chisholm, J. R. M., Marchioretta, M., Jaubert, J. M. (2002). Discrimination of coral reflectance spectra in the Red Sea. *Coral Reefs*, 21, 307-314.

Mobley, D. C, Stramski, D., Bissett, P. W., Boss, E., (2003). Is the Case 1, Case 2 Classification Still Useful? *Oceanography* vol. 17, nr 2, 60-68 pp.

Morel, A., Prieur, L. (1977). Analysis of variations in ocean colour. *Limnology and Oceanography*, 22, 709-722.

Pasqualini, V., Pergent-Martini, C., Pergent, G., Agreil, M., Skoufas, G., Sourbes, L., Tsirika, A. (2005). Use of SPOT 5 for mapping seagrasses: An application to *Posidonia oceanica*. *Remote Sensing of Environment*, 94, 39-45.

Phinn, S.R., Dekker, A.G., Brando, V.E., & Roelfsema, C.M. (2004). Mapping water quality and substrate cover in optically complex coastal and reef waters: an integrated approach. *Marine Pollution Bulletin*, 51, 459-469.

Vahtmäe, E., Kutser, T., Martin, G., Kotta, J. (2006). Feasibility of hyperspectral remote sensing for mapping benthic macroalgal cover in turbid coastal waters - a Baltic Sea case study. *Remote Sensing of Environment*, 101, 342 - 351.

Werdell, P. J., Roesler, C. S. (2003). Remote assessment of benthic substrate composition in shallow waters using multispectral reflectance. *Limnology and Oceanography*, 48, 557-567.

Wikipedia, http://et.wikipedia.org/wiki/V%C3%A4ikese_v%C3%A4ina_tamm, 25.03.2013

Wittlinger, S. K., Zimmerman, R. C. (2000). Hyperspectral remote sensing of subtidal macroalgal assemblages in optically shallow waters. *Proc. Ocean Optics XV*. CD-ROM.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Laura Lõugas

(autori nimi)

(sünnikuupäev: 05.02.1990)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
“Muutused merepõhja taimestiku katvuses Landsati piltide põhjal.“,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Ph.D Tiit Kutser,

(juhendaja nimi)

- 1.1. reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2. üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 14.05.2013